

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 卓保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息(4696, 4790, 4887)	

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响

宋佳杰¹, 徐郗阳¹, 白金泽¹, 于琦¹, 程伯豪¹, 冯永忠^{1,2*}, 任广鑫¹

(1. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 为探究关中地区秸秆还田配施化肥对土壤养分和冬小麦产量的影响, 研究采用裂区试验设计, 主区为: 秸秆不还田 (S_0) 和秸秆还田 (S); 副区为: 不施肥 (WF)、氮肥 (NF) 和氮磷肥 (NPF). 应用生态化学计量的方法, 探究秸秆还田配施化肥下土壤碳氮磷含量变化及其和产量的关系. 结果表明, 秸秆和施肥互作对表层 (0~20 cm) 土壤有机碳、全氮和全磷含量均产生显著影响 ($P < 0.05$). 与 S_0 WF 处理相比, SNPF 处理显著提高表层 (0~20 cm) 土壤有机碳和全氮含量 ($P < 0.05$). 秸秆和年份互作对表层 (0~20 cm) 土壤全氮含量产生显著影响 ($P < 0.05$), 随着秸秆还田时间的增加, 在 2021 年 SWF 处理下表层 (0~20 cm) 土壤全氮含量显著高于 S_0 WF ($P < 0.05$). 秸秆和施肥及其互作对 20~40 cm 土层有机碳和全氮含量无显著影响 ($P > 0.05$), 但对 20~40 cm 土壤全磷含量产生显著影响 ($P < 0.05$), 与 SWF 处理相比, SNPF 处理显著增加了 20~40 cm 土层全磷含量 ($P < 0.05$). 秸秆还田配施化肥对土壤化学计量特征也产生显著影响. 与 S_0 WF 处理相比, S_0 NPF 处理能够降低表层 (0~20 cm) 土壤 C:N, 提高表层 (0~20 cm) 土壤 C:P 和 N:P. 与 SWF 处理相比, SNF 处理能够降低表层 (0~20 cm) 土壤 C:N. 秸秆还田配施化肥对冬小麦产量也产生显著影响, 2020 年和 2021 年 SNPF 处理与 S_0 WF 处理相比分别增产 24.23% 和 28.9%. 相关性分析表明, 产量与 C:N ($P < 0.05$) 和 C:P ($P < 0.01$) 呈显著正相关关系. 全氮和 N:P 与处理年份呈极显著正相关关系 ($P < 0.001$). 综上所述, 在关中地区秸秆还田配施氮磷肥处理 (SNPF) 会改善土壤养分, 改变土壤化学计量特征, 同时提高产量. 因此, 本研究结果表明秸秆还田配施氮磷肥 (SNPF) 是优化区域农田养分管理, 提高粮食生产能力的有效途径.

关键词: 冬小麦; 秸秆还田; 化肥; 土壤养分; 产量

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4839-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202112043

Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield

SONG Jia-jie¹, XU Xi-yang¹, BAI Jin-ze¹, YU Qi¹, CHENG Bo-hao¹, FENG Yong-zhong^{1,2*}, REN Guang-xin¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the effects of straw returning combined with fertilizer on soil nutrients and winter wheat yield in the Guanzhong area, an experimental split plot design was utilized. The main plot consisted of no straw returning (S_0) and straw returning (S). The sub-regions consisted of no fertilizer (WF), nitrogen fertilizer (NF), and nitrogen and phosphate fertilizer (NPF). Ecological stoichiometry was used to study the relationship between soil carbon, nitrogen, phosphorus content, and yield under straw returning combined with nitrogen and phosphorus fertilizer conditions. The results showed that straw and fertilization interactions had significant effects on soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus contents in the surface layer (0-20 cm) ($P < 0.05$). Compared with that in the S_0 WF treatment, the SNPF treatment significantly increased soil organic carbon and total nitrogen contents in the surface layer (0-20 cm) ($P < 0.05$). The interaction between straw and year had significant effects on soil total nitrogen content in the surface layer (0-20 cm) ($P < 0.05$). With the increase in straw returning time, the total nitrogen content of soil 0-20 cm under the SWF treatment was significantly higher than that under the S_0 WF treatment ($P < 0.05$). Straw and fertilization and their interaction had no significant effects on organic carbon and total nitrogen contents in the 20-40 cm soil layer ($P > 0.05$). Straw and straw interaction with fertilization significantly affected total P content in 20-40 cm soil ($P < 0.05$). Compared with that in the SWF treatment, the SNPF treatment significantly increased the total phosphorus content in the 20-40 cm soil layer ($P < 0.05$). Straw returning combined with chemical fertilizer also had a significant effect on soil stoichiometry. Compared with that in the S_0 WF treatment, the S_0 NPF treatment decreased soil C:N in the surface layer (0-20 cm) and increased soil C:P and N:P in the surface layer (0-20 cm). Compared with that in the SWF treatment, the SNF treatment reduced soil C:N in the surface layer (0-20 cm). Straw returning combined with chemical fertilizer also had a significant effect on winter wheat yield. In 2020 and 2021, the SNPF treatment increased production by 24.23% and 28.9%, respectively, compared with that of the S_0 WF treatment. Correlation analysis showed that yield was significantly positively correlated with C:N ($P < 0.05$) and C:P ($P < 0.01$). At the same time, total nitrogen and N:P were positively correlated with treatment years ($P < 0.001$). In conclusion, straw returning and that combined with nitrogen and phosphate fertilizer (SNPF) can improve soil nutrient characteristics, change soil stoichiometric characteristics, and increase yield in the Guanzhong area. Therefore, the results of this study indicate that straw returning combined with nitrogen and phosphate fertilizer (SNPF) is an effective way to optimize regional farmland nutrient management and improve grain production capacity.

Key words: winter wheat; straw returning; nitrogen phosphorus fertilizer; soil nutrient; yield

秸秆还田是秸秆资源化利用最有效的方式之一,也是实现农业绿色发展的重要举措^[1]. 据统计中国每年农业活动会产生 7~9 亿 t 的作物秸秆^[2,3], 秸秆还田不仅可以有效减少秸秆焚烧引起的资源浪费和环境污染,也可以作为有机物料补充土壤养分,改善土壤理化性质^[4,5]. 连续 3 a 的稻麦

秸秆还田试验表明,与秸秆不还田相比,秸秆还田能

收稿日期: 2021-12-05; 修订日期: 2022-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971859); 华北作物改良与调控国家重点实验室开放课题项目; 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目(2019BBF02007)

作者简介: 宋佳杰(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为农田土壤养分管理和生态化学计量, E-mail: 18434763370@163.com

* 通信作者, E-mail: fengyz@nwsuaf.edu.cn

够显著增加土壤氮(2.61%)、磷(4.05%)、钾(18.25%)和有机质(5.90%)的含量^[6]。然而也有研究表明,单一秸秆还田会导致土壤 C:N 失衡,造成土壤微生物与作物争夺氮素,影响作物生长^[7]。与此同时,单一秸秆还田不能完全满足作物生长对土壤养分的需求,作物增产效果不明显^[8]。秸秆还田配施化肥已经成为了培肥增产的重要举措^[9]。宫明波等^[10]的研究表明,秸秆还田配施中等氮肥可以显著提高土壤有机质和速效钾含量,同时显著提高作物产量。Chen 等^[11]利用 7 a 定位试验研究表明,秸秆还田配施化肥可以显著提高土壤有机碳、全氮和速效磷含量。秸秆还田配施化肥可以有效提高 0~20 cm 全氮含量^[12]。有研究表明,与单独外源秸秆输入相比,外源秸秆和氮肥共同输入改善了土壤 C:N,促进了土壤内外有机碳的分解^[13]。作物秸秆还田不仅改善土壤理化性质,而且对农田 C、N、P 元素的循环有很大的影响。

生态化学计量学作为一门新兴学科,为 C、N、P 等元素的生物地球化学循环的研究提供了新思路和新方法^[14]。国内外学者对于陆地、海洋、森林、草原、茶园和湿地等生态系统的生态化学计量特征已经进行了大量的研究^[15~18]。在农田生态系统研究较少,前人研究表明,土地利用方式会通过改变土壤的输入和输出,改变地上植物群落,改变土壤 C、N、P 的生物地球化学循环^[19,20]。施肥可以影响农作物 N、P 等元素的吸收和分配,从而导致土壤养分含量和生态化学计量比发生变化^[21]。长期定位试验也表明,施肥会影响土壤-植株碳氮磷生态化学计量特征,并且表明生态化学计量比对农田土壤养分具有指示作用^[22]。但是在农田生态系统中,秸秆还田配施化肥对生态化学计量特征的研究却鲜见报道。

目前秸秆还田可以改善土壤理化性质,提高作物产量已经成为共识,但是秸秆还田如何影响土壤化学计量特征?土壤化学计量特征和产量之间的关系如何?目前仍然没有明确的结论。因此本文以冬小麦为研究对象,分析秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响,并且探究秸秆还田配施化肥下,土壤化学计量特征和产量之间的关系,以期为关中地区科学合理利用秸秆,调节土壤养分提高作物产量提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2019~2021 年在陕西省西北农林科技大学曹新庄试验农场(E108°04', N34°17')进行。该地区位于关中平原中部,主要种植制度为麦-玉

作,一年两熟制;属于典型的暖温带半湿润季风气候,年平均降水量为 660 mm,主要集中在 7~9 月,年均气温 12.9℃,年日照时数 2 163.5 h,平均蒸发量 993.2 mm,湿润指数 0.64,无霜期 211 d。试验地土壤为壤土,基础理化性质: ω (有机质)为 7.79 g·kg⁻¹、 ω (全氮)为 1.4 g·kg⁻¹、 ω (全磷)为 0.53 g·kg⁻¹、 ω (速效磷)为 9.97 g·kg⁻¹、 ω (速效钾)为 143.44 g·kg⁻¹、 ω (碱解氮)为 28.47 g·kg⁻¹和 pH 为 8.26。

1.2 试验设计

本试验开始于 2019 年 6 月,采用裂区设计,主区为:秸秆不还田(S_0)和秸秆还田(S);副区为:不施肥(WF)、氮肥(NF)和氮磷肥(NPF),组成秸秆不还田不施肥(S_0 WF)、秸秆不还田配施氮肥(S_0 NF)、秸秆不还田配施氮磷肥(S_0 NPF)、秸秆还田不施肥(SWF)、秸秆还田配施氮肥(SNF)和秸秆还田配施氮磷肥(SNPF)共 6 个处理,3 次重复,共 18 个小区,试验区面积均为 64 m²(8 m×8 m)。供试冬小麦品种为晋麦 47,每年 10 月 10~15 日播种,次年 6 月上旬收获。施肥于每年冬小麦和夏玉米播种前作为基肥一次性施入,冬小麦施肥量为:NF 225 kg·hm⁻²(N, 尿素),NPF 225 kg·hm⁻²(N, 尿素)和 140 kg·hm⁻²(P₂O₅, 过磷酸钙),WF 不施肥。夏玉米施肥量为:NF 180 kg·hm⁻²(N, 尿素),NPF 180 kg·hm⁻²(N, 尿素)和 90 kg·hm⁻²(P₂O₅, 过磷酸钙),WF 不施肥。冬小麦和夏玉米均不施用钾肥。其余田间管理措施与当地农户保持一致。

秸秆不还田(S_0)在作物收获后,地上部秸秆采用人工方式移除农田,留茬高度为 5 cm。秸秆还田(S)将作物秸秆全部还田(玉米季秸秆还田量为 7 500 kg·hm⁻²,小麦季秸秆还田量为 6 000 kg·hm⁻²),先用秸秆粉碎机将小区内所有秸秆粉碎,散布于土壤表面。随后所有小区采用旋耕,其中旋耕深度为 10 cm。

1.3 测定项目及方法

土壤样品以五点取样法于每年 6 月中旬冬小麦收获后,采集 0~40 cm 土层土样(20 cm/层)土壤样品经室内自然风干、剔除秸秆及小石块等杂物后,研磨过筛(100 目)待测。土壤样品测定方法为:有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法,全氮(TN)采用凯氏法消解,AA3 型连续流动分析仪测定,全磷(TP)采用 H₂SO₄-HClO₄ 消解^[23]。冬小麦成熟期,去除边际效应各处理随机收获 1 m²,重复 3 次,测定产量。

1.4 数据处理与分析

本研究土壤 C:N、C:P 和 N:P 均采用元素质量比。采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对试

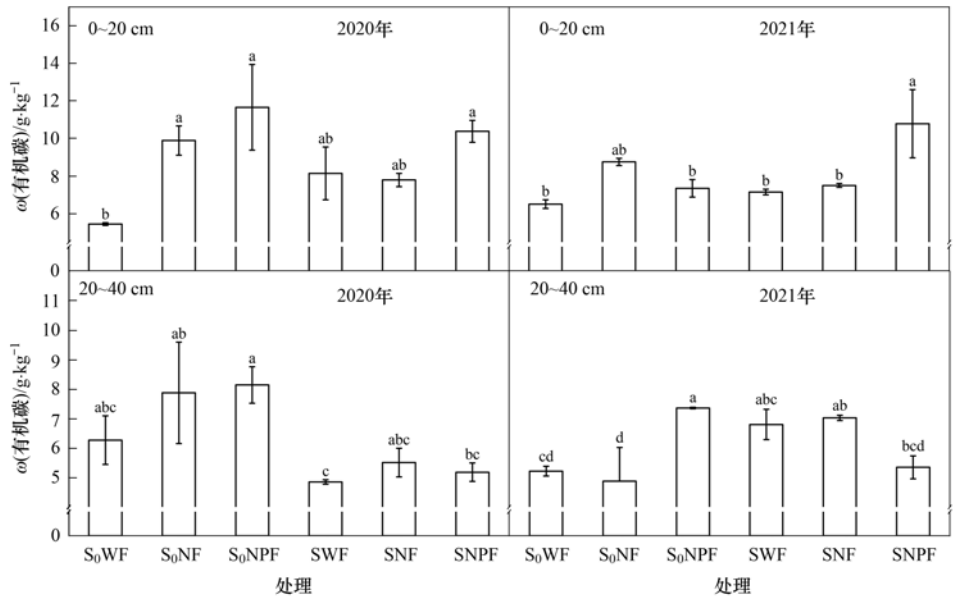
验数据进行整理分析. 不同处理间进行单因素方差分析及 LSD 多重比较($P < 0.05$), 使用 Origin 2021b 进行数据的可视化.

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施化肥对土壤养分的影响

多因素方差分析表明(表 1), 施肥对表层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳含量产生极显著影响($P <$

0.001), 连续 2 a 试验结果表明(图 1), 与 S_0WF 处理相比, S_0NF 和 S_0NPF 处理均提高表层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳含量. 秸秆与施肥互作对表层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳含量产生显著影响($P < 0.05$), 连续 2 a 试验结果也表明, 与 S_0WF 处理相比, SNPF 处理显著提高表层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳含量($P < 0.05$). 多因素方差分析表明, 秸秆和施肥及其互作对 20 ~ 40 cm 土壤有机碳含量无显著影响($P > 0.05$).

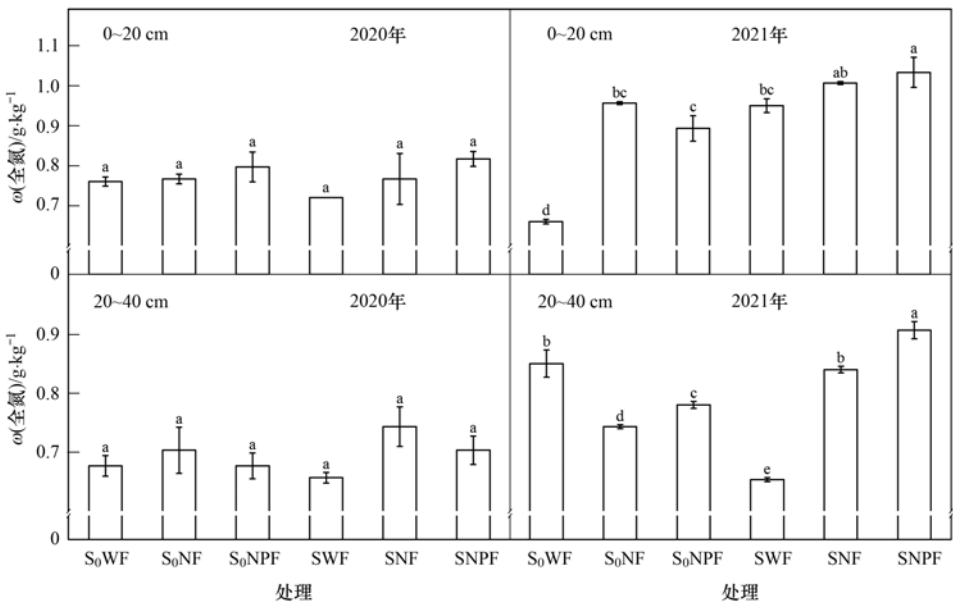


不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)
图 1 秸秆还田配施化肥下土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content under straw returning and fertilizer application

多因素方差分析表明(表 1), 秸秆、施肥和处理年份及其互作对表层(0 ~ 20 cm)土壤全氮含量

均产生显著影响. 由图 2 分析可得, 随着秸秆还田时间的增加, SWF 处理下表层(0 ~ 20 cm)土壤全氮含



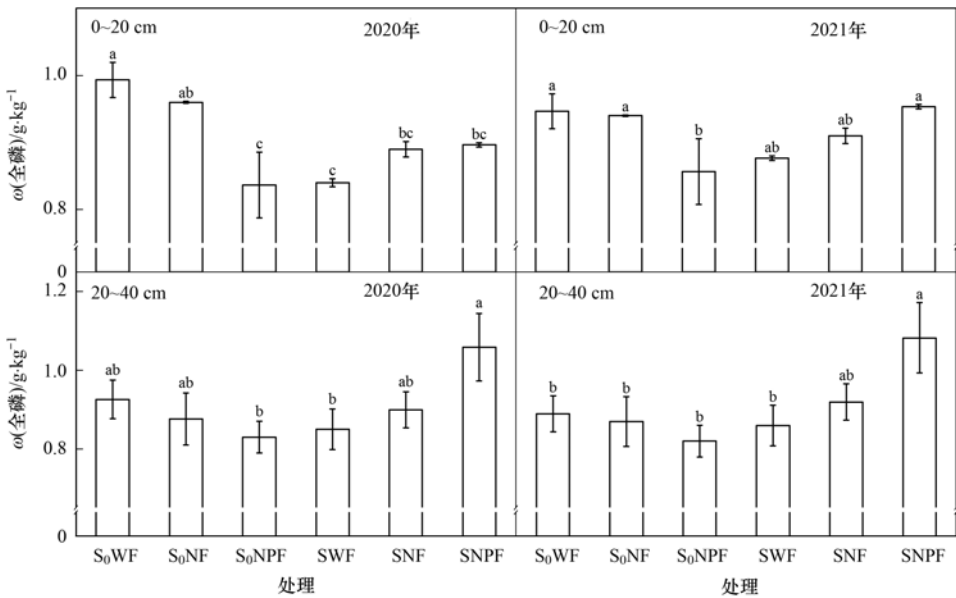
不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)
图 2 秸秆还田配施化肥下土壤全氮含量

Fig. 2 Soil total nitrogen content under straw returning and fertilizer application

量显著高于 S_0WF ($P < 0.05$). 随着施肥年份的增加, S_0NF 和 S_0NPF 处理下表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全氮含量均显著高于 S_0WF ($P < 0.05$). 秸秆和施肥互作对表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全氮含量也产生显著影响 ($P < 0.05$), 与 S_0WF 处理相比, SNF 和 SNPF 处理均显著提高表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全氮含量. 多因素方差分析表明, 单一秸秆和施肥对 $20 \sim 40$ cm 土壤全氮含量无显著影响 ($P > 0.05$). 但是施肥和处理年份互作对 $20 \sim 40$ cm 土壤全氮含量有显著性影响 ($P < 0.05$), 2021 年 S_0NF 和 S_0NPF 处理与 2020 年相比, 显著提高了 $20 \sim 40$ cm 土壤全氮含量 ($P < 0.05$).

多因素方差分析表明 (表 1), 施肥显著影响表

层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全磷含量 ($P < 0.01$), 连续 2 a 试验结果表明 S_0NPF 处理下表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全磷含量显著低于 S_0WF 处理 ($P < 0.05$). 由图 3 分析可得, 秸秆和施肥互作对表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全磷含量也产生极显著影响 ($P < 0.001$), 连续 2 a 试验结果也表明, SNF 和 SNPF 处理下, 表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤全磷含量高于 SWF 处理 ($P > 0.05$). 多因素方差分析也表明, 秸秆处理和秸秆与施肥互作对 $20 \sim 40$ cm 土层全磷含量均产生显著影响 ($P < 0.01$), 连续 2 a 试验结果表明, 与 SWF 处理相比, S_0WF 处理增加了 $20 \sim 40$ cm 土层全磷含量 ($P > 0.05$), SNPF 处理显著增加了 $20 \sim 40$ cm 土层全磷含量 ($P < 0.05$).



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 秸秆还田配施化肥下土壤全磷含量

Fig. 3 Soil total P content under straw returning and fertilizer application

表 1 秸秆、施肥和年份及其交互作用对土壤养分指标的影响¹⁾

Table 1 Effects of straw, fertilization, year, and their interactions on soil nutrient indexes

土壤指标	0 ~ 20 cm			20 ~ 40 cm		
	有机碳	全氮	全磷	有机碳	全氮	全磷
秸秆	ns	*	ns	ns	ns	**
施肥	***	***	**	ns	ns	ns
年份	ns	***	ns	ns	***	ns
秸秆 × 施肥	*	*	***	ns	ns	**
秸秆 × 年份	ns	*	ns	ns	ns	ns
施肥 × 年份	ns	***	ns	ns	*	ns

1) * 表示 $P < 0.05$ 的显著性, ** 表示 $P < 0.01$ 的显著性, *** 表示 $P < 0.001$ 的显著性, ns 表示不显著

2.2 秸秆还田配施化肥对土壤化学计量特征的影响

连续 2 a 试验结果表明, 不同处理下表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤 C: N 为 7.19 ~ 14.70、C: P 为 5.49 ~ 14.31 和 N: P 为 0.70 ~ 1.10 (表 2). 由表 2 多因素

方差分析结果表明, 秸秆处理对表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤化学计量特征无显著影响 ($P > 0.05$), 施肥对表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤化学计量特征产生显著影响. 随着施肥时间的增加, 在 2021 年与 S_0WF 处理相比, S_0NPF 和 S_0NF 处理均降低表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤 C: N ($P > 0.05$). 施肥对表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤 C: P 和 N: P 均产生极显著影响 ($P < 0.001$), 连续 2 a 试验结果表明, 与 S_0WF 处理相比, S_0NF 和 S_0NPF 处理均提高表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤 C: P, S_0NPF 处理显著提高表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤 N: P ($P < 0.05$). 秸秆还田与施肥互作对表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤化学计量特征无显著影响 ($P > 0.05$), 但是连续 2 a 试验结果表明, 与 SWF 处理相比, SNF 处理能够降低表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤 C: N.

连续 2 a 试验结果表明, 不同处理下 $20 \sim 40$ cm

土壤 C: N 为 5.89 ~ 12.08、C: P 为 4.95 ~ 9.83 和 N: P 为 0.67 ~ 0.96 (表 2)。由表 2 多因素方差分析结果表明, 秸秆处理对 20 ~ 40 cm 土壤化学计量产生显著影响 ($P < 0.05$), 随着秸秆还田时间的增加, 在 2021 年与 S_0 WF 处理相比, SWF 处理均能显著提高 20 ~ 40 cm 土壤 C: N 和 C: P。秸秆处理和施肥互作对 20 ~ 40 cm 土壤化学计量产生显著影响 ($P < 0.05$), 随着处理时间的增加, 在 2021 年与 SWF 处理相比, SNF 处理能够降低 20 ~ 40 cm 土壤 C: N 和 C: P。

表 2 秸秆还田配施化肥下土壤化学计量特征¹⁾

Table 2 Soil stoichiometry under straw returning and fertilizer application							
年份	处理	0 ~ 20 cm			20 ~ 40 cm		
		C: N	C: P	N: P	C: N	C: P	N: P
2020	S_0 WF	7.19 ± 0.18b	5.49 ± 0.09c	0.77 ± 0.03b	9.37 ± 1.45ab	6.78 ± 0.91ab	0.73 ± 0.05a
	S_0 NF	12.88 ± 0.81a	10.30 ± 0.8abc	0.80 ± 0.01ab	10.97 ± 1.75a	9.33 ± 2.73a	0.82 ± 0.11a
	S_0 NPF	14.70 ± 2.83a	14.31 ± 3.44a	0.96 ± 0.1a	12.08 ± 0.63a	9.83 ± 0.59a	0.81 ± 0.02a
	SWF	11.33 ± 1.93ab	9.68 ± 1.66abc	0.85 ± 0.01ab	7.39 ± 0.19b	5.77 ± 0.44ab	0.78 ± 0.04a
	SNF	10.30 ± 0.57ab	8.81 ± 0.5bc	0.86 ± 0.08ab	7.50 ± 0.73b	6.14 ± 0.65ab	0.82 ± 0.05a
	SNPF	12.69 ± 0.46a	11.60 ± 0.66ab	0.91 ± 0.02ab	7.39 ± 0.44b	4.97 ± 0.58b	0.67 ± 0.08a
平均值	S_0	11.59	9.68	0.84	10.81	8.65	0.79
平均值	S	11.44	10.03	0.87	7.43	5.63	0.76
2021	S_0 WF	9.85 ± 0.24ab	6.91 ± 0.44b	0.70 ± 0.03b	6.16 ± 0.03bc	5.90 ± 0.49bc	0.96 ± 0.08a
	S_0 NF	9.15 ± 0.18ab	9.3 ± 0.21ab	1.02 ± 0a	6.54 ± 1.51bc	5.47 ± 0.91c	0.87 ± 0.06a
	S_0 NPF	8.22 ± 0.22ab	8.60 ± 0.05b	1.05 ± 0.02a	9.45 ± 0.08a	9.02 ± 0.48a	0.95 ± 0.04a
	SWF	7.53 ± 0.29b	8.17 ± 0.13b	1.09 ± 0.03a	10.40 ± 0.76a	8.07 ± 1.11a	0.77 ± 0.05a
	SNF	7.47 ± 0.07b	8.22 ± 0.01b	1.10 ± 0.01a	8.39 ± 0.14ab	7.67 ± 0.42ab	0.91 ± 0.04a
	SNPF	10.59 ± 2.14a	11.32 ± 1.86a	1.09 ± 0.04a	5.89 ± 0.33c	4.95 ± 0.04c	0.85 ± 0.06a
平均值	S_0	9.07	8.27	0.92	7.38	6.80	0.93
平均值	S	8.53	9.24	1.09	8.23	6.90	0.84
秸秆		ns	ns	ns	**	**	ns
施肥		*	***	***	ns	ns	ns
年份		**	ns	***	**	ns	**
秸秆 × 施肥		ns	ns	ns	**	**	ns
秸秆 × 年份		ns	ns	ns	**	*	ns
施肥 × 年份		ns	ns	ns	**	*	ns

1) 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) ; 数据均为平均值 ± 标准误; * 表示 $P < 0.05$ 的显著性, ** 表示 $P < 0.01$ 的显著性, *** 表示 $P < 0.001$ 的显著性, ns 表示不显著; C: N 表示有机碳: 全氮, C: P 表示有机碳: 全磷, N: P 表示全氮: 全磷

2.3 秸秆还田配施化肥对冬小麦产量的影响

由表 3 多因素方差分析结果表明, 秸秆处理对冬小麦的产量表现出极显著影响 ($P < 0.001$), 随着秸秆还田时间的增加, 2021 年与 2020 年相比 SWF 处理产量提高了 1.97% (表 3)。施肥处理对冬小麦的产量表现出显著影响 ($P < 0.05$), 连续 2 a 试验结果表明, 与 S_0 WF 相比, S_0 NF 和 S_0 NPF 处理均显著提高冬小麦产量 ($P < 0.05$)。秸秆和施肥处理互作对冬小麦产量也产生影响 ($P > 0.05$), 连续 2 a 试验结果表明, 与 S_0 WF 相比, SNF 和 SNPF 处理均提高冬小麦产量。

2.4 冬小麦产量对土壤碳氮磷及化学计量特征变化的响应

由图 4 可知, 产量与 C: N 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$) 与 C: P 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), N: P 与年份 ($P < 0.001$)、SOC ($P < 0.01$)、TN ($P < 0.001$) 和 C: P ($P < 0.001$) 呈显著正相关关系, 与 TP 呈极显著负相关关系 ($P < 0.001$)。C: P 与 SOC 和

表3 秸秆还田配施化肥对冬小麦产量的影响¹⁾

Table 3 Effects of straw returning and fertilizer application on winter wheat yield		
处理	产量/kg·hm ⁻²	
	2020 年	2021 年
S_0 WF	4 878.15 ± 227.68c	4 905.00 ± 54.85c
S_0 NF	6 274.15 ± 222.77ab	6 245.00 ± 239.6a
S_0 NPF	6 441.65 ± 421.09a	5 885.00 ± 66.4ab
SWF	4 864.00 ± 209.69c	4 960.00 ± 184.75c
SNF	5 057.20 ± 331.05bc	5 380.00 ± 352.18bc
SNPF	6 060.25 ± 694.06abc	6 325.00 ± 447.45a
秸秆	***	
施肥	*	
年份	ns	
秸秆 × 施肥	ns	
秸秆 × 年份	ns	
施肥 × 年份	ns	

1) 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) ; 表中数据均为平均值 ± 标准误; * 表示 $P < 0.05$ 的显著性, ** 表示 $P < 0.01$ 的显著性, *** 表示 $P < 0.001$ 的显著性, ns 表示不显著

C: N 呈显著正相关关系 ($P < 0.001$), 与 TP 呈显著负相关关系 ($P < 0.001$)。C: N 与 SOC 呈显著正相

关关系 ($P < 0.001$), 与年份 ($P < 0.01$) 和 TP ($P < 0.05$) 呈显著负相关关系. TN 与年份 ($P < 0.001$) 和 SOC ($P < 0.05$) 呈显著正相关关系.

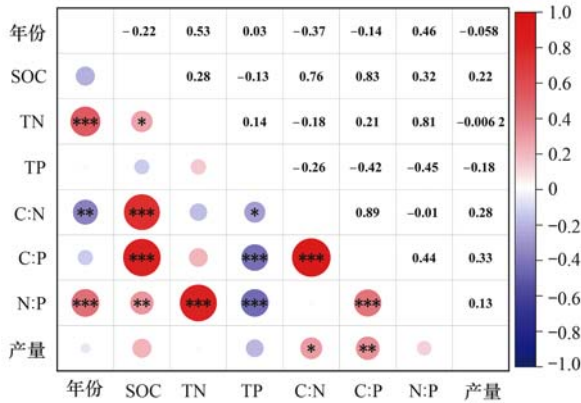


图 4 土壤碳氮磷含量及化学计量特征与冬小麦产量之间的相关性

Fig. 4 Correlation between soil C, N, P contents and stoichiometric characteristics and winter wheat yield

3 讨论

3.1 秸秆还田配施化肥对土壤养分的影响

有机碳作为农田生态系统中土壤生物化学循环的关键^[24], 40 a 田间定位试验表明, 秸秆还田配施化肥能显著增加 0~20 cm 土壤有机碳含量, 并且这一效应随着还田年限的增加, 其对土壤理化性质的改善作用越明显^[25,26]. 也有研究表明, 与单施化肥相比, 秸秆还田配施化肥对农田土壤的固碳效果更好^[27]. 本研究也发现, 秸秆还田配施氮磷肥处理能显著增加 0~20 cm 土壤有机碳含量(图 1), 这与前人的研究结果一致. 然而, 长期单施氮磷肥会加速土壤有机碳的分解, 最终导致土壤碳库一定程度地减少^[28], 加之秸秆不还田移除了大量地上部有机物料, 致使微生物可利用的活性有机碳较少, 需要挖掘土壤原有有机碳来满足自身的碳需求, 因此会造成原有有机碳矿化加速, 导致土壤新形成的有机碳不能抵消原有有机碳的矿化, 从而导致有机碳逐年降低^[29], 同样本研究连续 2 a 试验也证实了这一观点, 在秸秆不还田情况下单施氮磷肥, 0~20 cm 土壤有机碳含量有下降的趋势(图 1). 本研究也发现随着秸秆还田年限的增加, 秸秆还田配施氮磷肥处理与秸秆不还田配施氮磷肥相比显著增加 20~40 cm 土壤有机碳含量, 一方面是因为秸秆还田减少对 20~40 cm 土壤扰动^[30], 另一方面可能是因为表层(0~20 cm)有机碳向下再分配的结果^[31], 从而导致 20~40 cm 土壤有机碳含量显著增加.

种植制度和农田管理措施等人类活动对土壤全氮含量的调节有至关重要的作用. 有研究表明, 秸秆

还田可以减缓氮素下移趋势, 从而增加表层(0~20 cm)土壤氮素含量^[32]. 秸秆还田添加氮肥加速秸秆腐解, 改善土壤团粒结构和土壤水分等物理状况^[33], 从而促进作物的生长, 让更多的根茬归还土壤^[34], 从而导致土壤耕层全氮含量的升高. 同时由于禾本科作物秸秆 C:N 较高, 不易分解, 配施适量氮肥可以提高土壤脲酶活性和增加亚硝酸细菌等微生物数量促进氮素积累^[35]. 本研究连续 2 a 试验结果也表明, 秸秆还田配施氮肥能够增加表层(0~20 cm)土壤全氮含量(图 1), 与前人的研究结果一致.

磷素作为生命系统的主要营养元素及生态系统中重要的养分限制因子. 秸秆还田能够促进土壤微生物的繁殖和生长, 较高的微生物量对土壤磷的矿化能够起到很好的促进作用^[36], 从而显著增加土壤磷素含量^[37]. 也有研究表明, 秸秆还田对土壤全磷含量没有影响, 但是提高了土壤中速效磷含量^[38]. 本研究结果表明秸秆还田下, 各处理对表层(0~20 cm)土壤全磷含量无显著影响, 但各处理促使 20~40 cm 土层全磷含量高于 0~20 cm 土壤, 可能的原因是秸秆还田增加了土壤有机碳的含量, 降低了土壤对磷素的吸附作用^[39], 同时秸秆还田增加了土壤微生物的呼吸作用, 降低了对磷素的固持, 秸秆腐解过程中, 由于纤维素和木质素降解程度不同, 导致秸秆形成疏松多孔结构, 从而使得水分入渗更加容易, 使得土壤中的磷素随着水分迁移到深层土壤^[40], 从而导致深层土壤磷含量升高.

3.2 秸秆还田配施化肥对土壤化学计量特征的影响

土壤 C:N 是土壤质量变化敏感指标之一, 土壤 C:N 与有机质的分解速率呈反比关系. 连续 2 a 试验结果表明, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田下表层(0~20 cm)土壤 C:N 为 8.53~11.44, 小于全球土壤(14.30)^[41]、中国农田土壤(11.90)^[42]和西北农田土壤(12.90)^[43], 整体处于中等偏低水平, 表明秸秆还田处理下微生物对有机质的分解速率较快不利于有机碳的固存, 但有利于植物生长吸收. 同时连续 2 a 试验结果表明, 秸秆还田配施氮肥与秸秆还田不施肥相比能够降低表层(0~20 cm)土壤 C:N, 并且 2021 年试验结果表明, 与秸秆不还田不施肥相比, 秸秆还田配施氮肥能够降低表层(0~20 cm)土壤 C:N ($P > 0.05$), 这表明秸秆还田配施氮肥能够有效调节土壤 C:N, 缓解土壤微生物与作物“争氮”现象.

该地区化学计量比与其他地区进行比较可得, 该地区表层土壤 C:P 和 N:P 均小于全球土壤(C:P 为 186.00、N:P 为 13.10)、中国农田土壤(C:P 为 61.00、N:P 为 16.30)和西北农田土壤(C:P 为

40.30、N:P 为 1.90), 并且本研究结果也表明不同处理对表层土壤全磷含量无显著影响, 加之磷素在农田土壤中比较稳定, 因此不同处理对于表层土壤 C:P 和 N:P 的影响主要是通过影响表层土壤有机碳和全氮的含量所引起的, 综合可得, 该地区土壤碳氮含量仍处于较低水平。

3.3 秸秆还田配施化肥对冬小麦产量的影响

由于受秸秆还田年限、秸秆还田方式、土壤类型和气候条件等的影响, 对秸秆还田是否增产也存在不同的研究结果。研究表明秸秆还田会导致土壤的水分、养分和温度与外界环境不协调, 从而导致减产^[44]。有机物料(秸秆、有机肥)的添加可以改善土壤肥力增加土壤的碳氮库存^[45], 然而秸秆还田会引起土壤 C:N 过高, 会造成微生物消耗土壤养分, 造成作物前期缺肥, 进而影响产量^[46]。Meta 分析结果表明^[47], 秸秆还田可以通过改变土壤水分从而增产 5.0%。王永鹏^[48]的多点试验表明, 秸秆还田可通过提高土壤有机碳含量, 提高土壤养分从而达到增产 6%~12%。本研究结果表明, 在 2020 年秸秆不还田配施氮磷肥产量最高, 然而随着处理时间的增加, 在 2021 年秸秆还田配施氮磷肥处理下产量最高。分析其原因, 可能是秸秆还田配施氮磷肥对于土壤氮素的改善是一个长期缓慢的过程, 并且相关性分析(图 4)也表明, 土壤全氮与处理年份呈显著正相关关系($P < 0.001$), 全氮与产量呈正相关关系($P > 0.05$), 因此长期秸秆还田配施氮磷肥才能达到培肥增产的目的。

4 结论

(1) 在关中地区长期秸秆还田能够改善土壤养分状况, 秸秆还田配施氮磷肥对表层(0~20 cm)土壤有机碳和全氮含量有提升作用。

(2) 从化学计量学角度来看, 秸秆还田配施氮肥能够降低表层(0~20 cm)土壤 C:N, 该地区与全国其他地区相比, 农田土壤碳氮含量仍处于较低水平。

(3) 本研究发现土壤 C:N 和 C:P 是影响冬小麦产量变化的关键因子。

(4) 在 2021 年秸秆还田配施氮磷肥处理下冬小麦产量最高, 是优化区域农田养分管理、提高粮食生产能力的有效途径。

参考文献:

[1] 陈云峰, 夏贤格, 杨利, 等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 299-307.
Chen Y F, Xia X G, Yang L, *et al.* Straw return is the realistic way of straw resource utilization [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (6): 299-307.

[2] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1-21.

[3] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3985-3996.
Jin Y T, Li X F, Cai Y, *et al.* Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation [J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3985-3996.

[4] Xu M G, Lou Y L, Sun X L, *et al.* Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(7): 745-752.

[5] Fang Y Y, Nazaries L, Singh B K, *et al.* Microbial mechanisms of carbon priming effects revealed during the interaction of crop residue and nutrient inputs in contrasting soils [J]. Global Change Biology, 2018, 24(7): 2775-2790.

[6] 徐将来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 215-222.
Xu J L, Hu N J, Zhu L Q. Effect of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field [J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(2): 215-222.

[7] 侯亚红, 王磊, 付小花, 等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2655-2661.
Hou Y H, Wang L, Fu X H, *et al.* Response of straw and straw biochar returning to soil carbon budget and its mechanism [J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2655-2661.

[8] Limon-Ortega A, Sayre K D, Francis C A. Wheat and maize yields in response to straw management and nitrogen under a bed planting system [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(2): 295-302.

[9] Yang S Q, Wang Y S, Liu R L, *et al.* Improved crop yield and reduced nitrate nitrogen leaching with straw return in a rice-wheat rotation of Ningxia irrigation district [J]. Scientific Reports, 2018, 8, doi: 10.1038/s41598-018-27776-5.

[10] 宫明波, 王圣健, 李振清, 等. 麦玉两熟秸秆长期全量还田模式下氮肥对冬小麦生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 7-14.
Gong M B, Wang S J, Li Z Q, *et al.* Wheat-corn cropping system with long-term total straw returning: effects of nitrogen application on growth, yield and quality of winter wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(20): 7-14.

[11] Chen Y L, Xin L, Liu J T, *et al.* Changes in bacterial community of soil induced by long-term straw returning [J]. Scientia Agricola, 2017, 74(5): 349-356.

[12] Nafi E, Webber H, Danso I, *et al.* Soil tillage, residue management and site interactions affecting nitrogen use efficiency in maize and cotton in the Sudan Savanna of Africa [J]. Field Crops Research, 2019, 244, doi: 10.1016/j.fcr.2019.107629.

[13] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 459-466.
Sun Z A, Zhang X, Hu Z J, *et al.* How different ratios of straw incorporation to nitrogen fertilization influence endogenous and exogenous carbon release from agricultural soils [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 459-466.

[14] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特

- 征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- [15] 勒佳佳, 苏原, 罗艳, 等. 围封对天山高寒草原 4 种植物叶片和土壤化学计量学特征的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(5): 1621-1628.
- Le J J, Su Y, Luo Y, *et al.* Effects of enclosure on leaves of four plants and soil stoichiometry in an alpine grassland of Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(5): 1621-1628.
- [16] Hecky R E, Campbell P, Hendzel L L. The stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans[J]. Limnology and Oceanography, 1993, **38**(4): 709-724.
- [17] 谢路路, 胡雪凤, 刘庆华, 等. 云杉碳氮化学计量比对土壤水分和氮有效性的响应[J]. 生态学报, 2020, **40**(15): 5377-5387.
- Xie L L, Hu X F, Liu Q H, *et al.* Response of C: N stoichiometry of *Picea asperata* to soil water and nitrogen availabilities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(15): 5377-5387.
- [18] 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 等. 降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤 C: N: P 生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 977-987.
- Gao J P, Zhao R F, Zhang L H, *et al.* Effects of precipitation changes on plant community diversity and soil C: N: P ecological stoichiometric characteristics in a desert steppe of China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 977-987.
- [19] Zheng S M, Xia Y H, Hu Y J, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil: effects of agricultural land use and climate at a continental scale[J]. Soil and Tillage Research, 2021, **209**, doi: 10.1016/j.still.2020.104903.
- [20] Wang M M, Chen H S, Zhang W, *et al.* Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 1299-1307.
- [21] Yang D X, Song L, Jin G Z. The soil C: N: P stoichiometry is more sensitive than the leaf C: N: P stoichiometry to nitrogen addition: a four-year nitrogen addition experiment in a *Pinus koraiensis* plantation[J]. Plant and Soil, 2019, **442**(1-2): 183-198.
- [22] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥下黄泥田土壤-水稻碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 土壤通报, 2017, **48**(1): 169-176.
- Wang F, Lin C, Li Q H, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in soil and plant under long-term different fertilizations in a yellow paddy field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(1): 169-176.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(11-12): 1485-1498.
- [25] 房静静, 丁维婷, 武雪萍, 等. 长期秸秆配施化肥对土壤养分及小麦产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (5): 141-146.
- Fang J J, Ding W T, Wu X P, *et al.* Effects of long-term straw and fertilizer combined application on soil nutrient, wheat yield and quality[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (5): 141-146.
- [26] Hua K K, Wang D Z, Guo Z B. Effects of long-term application of various organic amendments on soil particulate organic matter storage and chemical stabilisation of vertisol soil [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2018, **68**(6): 505-514.
- [27] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5680-5686.
- Ma X, Wei L, Tang M L, *et al.* Effects of varying long-term fertilization on organic carbon mineralization and priming effect of paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5680-5686.
- [28] Li C X, Ma S C, Shao Y, *et al.* Effects of long-term organic fertilization on soil microbiologic characteristics, yield and sustainable production of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, **17**(1): 210-219.
- [29] Shahbaz M, Kumar A, Kuzyakov Y, *et al.* Priming effects induced by glucose and decaying plant residues on SOM decomposition: a three-source $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ partitioning study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **121**: 138-146.
- [30] Yang C, Lin N, Zhang Y J. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration[J]. Geoderma, 2019, **337**: 444-452.
- [31] 张万锋, 杨树青, 孙多强, 等. 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 786-795.
- Zhang W F, Yang S Q, Sun D Q, *et al.* Effects of straw mulching and nitrogen reduction on the distribution of soil nitrogen and groundwater nitrogen pollution[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 786-795.
- [32] Lessmann M, Ros G H, Young M D, *et al.* Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management[J]. Global Change Biology, 2022, **28**(3): 1162-1177.
- [33] Zhang P, Wei T, Li Y L, *et al.* Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C: N ratio in a semiarid region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, **153**: 28-35.
- [34] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [35] Hyvönen R, Persson T, Andersson S, *et al.* Impact of long-term nitrogen addition on carbon stocks in trees and soils in northern Europe[J]. Biogeochemistry, 2008, **89**(1): 121-137.
- [36] Zamuner E C, Picone L I, Echeverria H E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices[J]. Soil and Tillage Research, 2008, **99**(2): 131-138.
- [37] Surekha K, Kumari A P P, Reddy M N, *et al.* Crop residue management to sustain soil fertility and irrigated rice yields[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, **67**(2): 145-154.
- [38] 胡宏祥, 汪玉芳, 陈祝, 等. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(5): 101-105.
- Hu H X, Wang Y F, Chen Z, *et al.* Effects of straw return with chemical fertilizer on nitrogen and phosphorus leaching from yellow cinnamon soil [J]. Journal of Soil and Water

- Conservation, 2015, **29**(5): 101-105.
- [39] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(1): 33-39.
- Guo S L, Dang T H, Liu S Z, *et al.* Changes in characterization of phosphorus sorption in relation to its forms and soil organic carbon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2005, **11**(1): 33-39.
- [40] Fusi A, Bacenetti J, González-García S, *et al.* Environmental profile of paddy rice cultivation with different straw management [J]. Science of the Total Environment, 2014, **494-495**: 119-128.
- [41] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, **85**(3): 235-252.
- [42] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, **98**(1-3): 139-151.
- [43] Liu X, Ma J, Ma Z W, *et al.* Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. CATENA, 2017, **150**: 146-153.
- [44] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(7): 15-19.
- Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, **21**(7): 15-19.
- [45] 盖霞普, 刘宏斌, 杨波, 等. 不同施肥年限下作物产量及土壤碳氮库容对增施有机物料响应[J]. 中国农业科学, 2019, **52**(4): 676-689.
- Gai X P, Liu H B, Yang B, *et al.* Responses of crop yields, soil carbon and nitrogen stocks to additional application of organic materials in different fertilization years [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, **52**(4): 676-689.
- [46] Lemke R L, Vandenbygaart A J, Campbell C A, *et al.* Crop residue removal and fertilizer N: effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **135**(1-2): 42-51.
- [47] Lu X L. A meta-analysis of the effects of crop residue return on crop yields and water use efficiency [J]. PLoS One, 2020, **15**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0231740.
- [48] 王永鹏. 秸秆还田与地膜覆盖耦合对玉米产量及土壤有机质平衡的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- Wang Y P. Effect of straw returning and plastic film mulching coupling on maize yield and the balance of organic matter in the Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.



CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)